

研究论文

A^2O 工艺处理低 C/N 比生活污水的试验研究

吴昌永¹, 彭永臻^{1,2}, 彭 轶¹

(¹ 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;

² 北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022)

摘要: 采用 52.5 L 的 A^2O 试验装置处理实际生活污水, 研究了 A^2O 工艺在处理低 C/N 比生活污水时的脱氮除磷特性, 并探讨了如何通过强化缺氧吸磷来提高系统的脱氮除磷效率。试验结果表明: 在厌氧/缺氧/好氧体积比为 1/1/2、HRT 为 8 h、污泥回流比为 70%、内回流比为 300% 的工况下处理 C/N 为 7.89 的生活污水, TN 和 SOP 去除率分别能够达到 85.4% 和 93.3%, 系统中存在反硝化除磷, 缺氧吸磷占总吸磷量的 25.3%。同样的运行条件下处理 C/N 为 4.20 的生活污水时, SOP 去除几乎不受影响, 但 TN 去除率降低至 62.2%, 平均出水 TN 浓度也超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。维持厌氧区体积不变, 增大缺氧区体积, 使得缺氧/好氧体积比为 5/8 时, TN 去除率可上升到 70.7%, 缺氧吸磷占总吸磷量的 55.2%。同时改变内回流比的试验表明 250% 的内回流比能最大程度地强化反硝化除磷的作用, 此时 TN 去除率可提高至 77.3%。强化 A^2O 工艺中的反硝化除磷, 能克服碳源不足对脱氮除磷的影响, 显著提高低 C/N 比污水的脱氮除磷效率。

关键词: 污水处理; 脱氮除磷; 反硝化除磷; A^2O 工艺

中图分类号: X 701.3

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 12-3126-06

Biological nutrient removal in A^2O process when treating
low C/N ratio domestic wastewater

WU Changyong¹, PENG Yongzhen^{1,2}, PENG Yi¹

(¹ State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150090, Heilongjiang, China; ² Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment

Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to investigate the performance of biological nutrients removal and denitrifying phosphorus removal in the A^2O process when treating low C/N ratio domestic wastewater, a reactor, with a working volume of 52.5 L, was used in this study. The volume ratio of anaerobic/anoxic/aerobic zone was 1/1/2 and the major operating parameters were: HRT 8 h, sludge recycle ratio (r) 70%, aerobic (nitrate) recycle ratio (R) 300%. The results showed that 85.4% of TN and 93.3% of SOP could be removed when the C/N ratio was 7.89. There was denitrifying phosphorus removal in the system. Moreover, up to 25.3% of the SOP could be removed in the anoxic zone by this way. The TN removal efficiency was reduced to 62.2% when decreasing the C/N ratio to 4.20 with the same operating parameters. However, the SOP removal efficiency was kept over 96.0%. The TN removal efficiency was 70.7% and up to 55.2% of SOP was removed in the anoxic zone when changing the volume ratio of

2008-04-02 收到初稿, 2008-09-12 收到修改稿。

联系人: 彭永臻。第一作者: 吴昌永 (1980—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金-海外青年学者合作研究基金项目 (50628808); 北京市教委科研基地科技创新平台项目 (PXM2008-014204-050843)。

Received date: 2008-04-02.

Corresponding author: Prof. PENG Yongzhen. E-mail: pyz@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the Joint Research Fund for Overseas Natural Science Foundation of China (50628808) and the Project of Scientific Research Base and Scientific Innovation Platform of Beijing Municipal Education Commission (PXM2008-014204-050843).

anoxic/aerobic to 5/8. With the same anoxic/aerobic ratio, when changing the aerobic (nitrate) recycle ratio to 250%, the maximal denitrifying phosphorus removal could be achieved, removing 77.3% of the TN from the system. Enhanced denitrifying phosphorus removal in the A²O process is an effective way to counteract the disadvantages of carbon shortage for biological nutrients removal.

Key words: wastewater treatment; biological nutrients removal; denitrifying phosphorus removal; A²O process

引 言

新的污水处理排放标准对氮磷等营养元素的控制要求越来越严格,在城市污水生物处理系统中,如何提高低 C/N 比污水的脱氮除磷效率一直是个难点。根据传统的脱氮理论,实现完全反硝化的理论 C/N 比值为 $2.86 \text{ kg COD} \cdot (\text{kg N})^{-1}$,但是由于微生物的生长,实际所需值通常为 $4.00 \text{ kg COD} \cdot (\text{kg N})^{-1}$ 以上^[1],由于生物除磷也需要碳源,因此在实际污水中当 $\text{COD}/\text{TN} < 5$ 时,脱氮除磷的效率通常不会太高。随着人们生活水平的提高和生活习惯的改变,城市污水的污染物组成及比例也有相应的变化,如今一些低 C/N 比的生活污水在很多城市并不少见,如云南昆明第二污水处理厂的进水 BOD_5 平均为 $91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但是进水的 TN 接近 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[2]。

A²O (厌氧-缺氧-好氧) 工艺作为一种最简单的同步脱氮除磷工艺,具有构造简单、总水力停留时间短、设计运行经验成熟、控制复杂性小和不易产生污泥膨胀等一系列优点,是传统活性污泥污水厂改建为具有脱氮除磷功能的污水厂的最佳选择工艺,该工艺也是目前我国城市污水厂中应用最广泛的同步脱氮除磷工艺之一。

然而 A²O 工艺也存在一系列的问题,比如硝化菌和除磷菌之间污泥龄的矛盾,基质竞争的矛盾等^[3],使得脱氮除磷效率的进一步提高非常困难。而一些工艺的出现,如反硝化除磷 (DPB) 可将反硝化和吸磷过程耦合,使得储存的碳源能够达到“一碳两用”,从而能够在节约碳源的基础上不降低脱氮除磷的效率。因此强化 A²O 工艺中的反硝化除磷作用,特别在处理低 C/N 比污水时,可以有效提高脱氮除磷效率。

作为一种成熟的工艺, A²O 工艺的设计运行参数主要针对的是普通的城市污水水质,而这些参数在针对低 C/N 比生活污水时是否合适,目前并

未见有详细研究的报道。

本文在 A²O 工艺的基础上,详细研究了其在处理低 C/N 比生活污水时的污染物去除特性,通过强化缺氧区的吸磷来最大程度地抵消碳源缺乏对脱氮除磷的影响,并对低 C/N 比条件下的 A²O 工艺的设计参数进行了研究,为实际采用 A²O 工艺的污水厂在处理低 C/N 比生活污水时能提高脱氮除磷效率提供了理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置与运行工况

A²O 试验装置如图 1 所示。装置用有机玻璃制成,由合建式厌氧-缺氧-好氧反应器和二沉池组成。合建式反应器有效容积为 52.5 L,反应器分为 9 个格室,在不改变体积比的情况下,前 2 个格为厌氧段,随后的 2 个格为缺氧段,剩下的 5 个格为好氧段,厌氧区、缺氧区和好氧区的体积比为 1:1:2。厌氧区和缺氧区用搅拌桨提供充分的搅拌,好氧区通过在格室底端的曝气头供氧同时促进液体混合。反应器温度通过加热装置控制在 21~22℃。二沉池有效容积为 26.0 L。

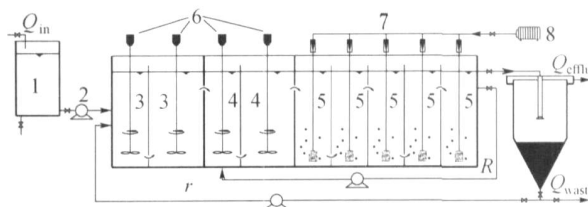


图 1 A²O 工艺示意图

Fig 1 Schematic diagram of A²O process

- 1—feed tank; 2—peristaltic pump; 3—anaerobic zone;
4—anoxic zone; 5—aerobic zone; 6—stirrer;
7—airflow meter; 8—air compressor

试验进水、回流污泥和硝化液回流采用蠕动泵控制。试验运行过程中维持不变的条件如下:进水量为 $157.5 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$,反应区相应 HRT 为 8 h,

SRT 通过排泥控制在 15 d 左右, 反应器中 MLSS 在 3500 ~ 4000 mg · L⁻¹, 污泥回流比为 70 %。当运行条件发生变化时, 在后面的分析过程中进行特别的说明。试验所用污泥取自哈尔滨某污水处理厂, 该厂采用 A/O 工艺运行, 种泥脱氮效果较好。

1.2 试验用水与分析测试方法

本试验所用污水取自哈尔滨工业大学二校区教工生活区, 并根据试验的需要对原污水水质进行了调节, 采用少量啤酒作为调节 COD 的碳源以避免采用单一成分化学药品带来的局限性, 氮和磷分别采用 NH₄Cl 和 KH₂PO₄。调节前的水质指标平均为: COD 372.8 mg · L⁻¹; NH₄⁺-N 41.30 mg · L⁻¹; PO₄³⁻-P 3.86 mg · L⁻¹, 调节至低 C/N 比生活污水的水质指标平均为: COD 241.0 mg · L⁻¹; NH₄⁺-N 47.40 mg · L⁻¹; PO₄³⁻-P 7.76 mg · L⁻¹。

试验测定的常规指标有: MLSS、MLVSS、COD、NH₄⁺-N、TN、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 和 SOP 等。这些指标采用国家环保总局颁布的标准分析方法测定。试验结果均采用重现性较好的数据。

确定聚磷菌 (PAOs) 中反硝化除磷菌 (DPAOs) 的比例的方法按照 Wachtmeister 等^[4]推荐的方法进行。本研究取适量好氧末端污泥, 加入 4 L 的 SBR 反应器, 先采用乙酸钠为碳源 (COD = 300.0 mg · L⁻¹) 的污水进行 2 h 的厌氧反应, 然后污泥平均分成两份并用含微量元素的水进行洗脱两遍, 然后一份足量曝气好氧运行 3 h, 另一份加入 50.00 mg · L⁻¹ 的 NO₃⁻-N 缺氧运行 3 h, 缺氧最大吸磷速率和好氧最大吸磷速率的比值 $K_{\text{anox}}/K_{\text{aer}}$ 反映了系统中 DPAOs 占 PAOs 的比例。

1.3 A²O 中反硝化吸磷量的计算

根据物料平衡计算系统中的缺氧吸磷量 (mg · L⁻¹), 计算公式为

$$P_{\text{an}} = \frac{Q_R C_{\text{O}} + (Q_{\text{in}} + Q_R) C_{\text{O}}}{Q_{\text{in}} + Q_R + Q_r} - C_{\text{an}}$$

式中 Q_{in} 为进水流量, L · h⁻¹; Q_R 为硝化液回流量, L · h⁻¹; Q_r 为污泥回流量, L · h⁻¹; C_{O} 为厌氧区末端 PO₄³⁻-P 浓度, mg · L⁻¹; C_{an} 为缺氧区末端 PO₄³⁻-P 浓度, mg · L⁻¹; C_{O} 为好氧区末端 PO₄³⁻-P 浓度, mg · L⁻¹。

1.4 试验安排

在经过大约 50 d 的驯化后, 污泥的性能较为稳定, 然后试验分以下 3 个阶段进行。

阶段 : 处理不经水质调节的原生活污水的试验;

阶段 : 在运行参数不变的情况下处理低 C/N 比生活污水;

阶段 : 改变运行参数, 探讨对处理低 C/N 比生活污水的影响。

2 试验结果与讨论

很多研究表明在连续流前置反硝化的工艺中可能存在反硝化除磷现象^[3,5], 但也可能没有^[6]。在整个试验过程中, 作者对反硝化除磷对系统脱氮和除磷的贡献进行了详细研究, 通过物料平衡计算表明系统中的确存在缺氧吸磷现象, 然后通过序批试验对系统中 DPAOs 占 PAOs 的比例进行了定量研究。

2.1 A²O 工艺处理未调节 C/N 比污水的脱氮除磷特性

在污泥驯化之后, A²O 系统的脱氮除磷性能较为稳定, 系统的内回流比为 300 %, 污泥回流比为 70 %。图 2 给出的是随后 46 d 约 3 个 SRT 时间内系统处理不经过 C/N 比调节的生活污水的污染物去除情况。从图中可以看出, 在处理 COD/TN 比平均为 7.89 的生活污水时, 系统的脱氮除磷效率很高: 平均进水 TN 浓度为 47.20 mg · L⁻¹, 出水 TN 浓度为 6.90 mg · L⁻¹, 去除率 85.4 %, 高于前置反硝化理论脱氮值, 这可能是由于生物同化作用或者系统中存在同时硝化反硝化脱氮作用的缘故; 平均进水 SOP 浓度为 8.42 mg · L⁻¹, 出水 SOP 浓度为 0.56 mg · L⁻¹, 去除率 93.3 %。物料平衡的计算表明, 阶段 存在缺氧吸磷现象, 缺氧吸磷占总吸磷量的 25.3 % 左右, 同时序批试验证明 DPAOs 占 PAOs 的比例在 15 % ~ 20 % 之间。说明 A²O 系统正常运行过程中存在反硝化吸磷现象。

2.2 A²O 工艺处理低 C/N 比污水的脱氮除磷特性

在阶段 的试验结束之后, 对原生活污水进行水质调节: 维持进水的 TN 和 SOP 浓度基本不变, 对 COD 进行稀释, 使得进水平均 COD/TN 在 4.20 左右。试验运行共 36 d, 约两个多 SRT。图 3 给出的是这 36 d 中系统的脱氮除磷变化。

从图中可以看出, 当污水的 C/N 比降低时, 系统除磷性能受到的影响较小, 进水 SOP 浓度平均为 7.36 mg · L⁻¹, 出水 SOP 浓度平均为 0.25 mg · L⁻¹, 去除率 96.6 %, 甚至比阶段 的除磷

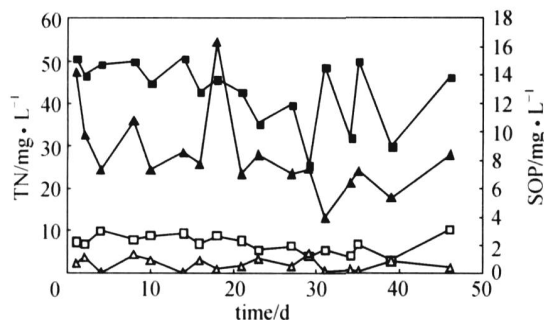
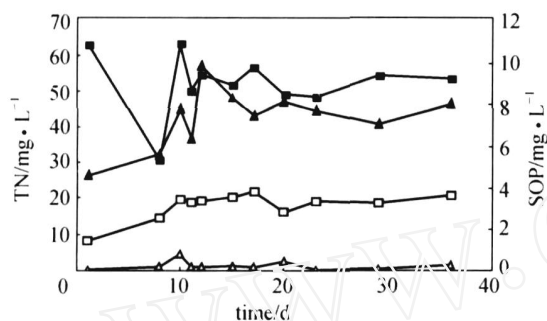


图 2 处理不经调节的污水时 TN 和 SOP 去除情况

Fig. 2 TN and SOP removal profiles when treating raw domestic wastewater

■ influ TN; □ efflu TN; ▲ influ SOP; △ efflu SOP

图 3 处理低 C/N 比污水时 TN 和 SOP 去除情况Fig. 3 TN and SOP removal profiles when treating low C/N ratio domestic wastewater

■ influ TN; □ efflu TN; ▲ influ SOP; △ efflu SOP

效率还要高。但是脱氮却受到很大影响,后期平均出水 TN 浓度已经超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率降低至 62.2%。但从图上也可以看出,在进水变为低 C/N 比污水的前几天, TN 去除率较后期要高,分析是刚改变进水时虽然水质发生了变化,但是反硝化微生物的数量不能马上随之变少, TN 去除率降低不明显,但长期低 C/N 比污水培养会引起微生物数量发生变化, TN 去除率也相应降低。

对 COD 进行的测定数据表明,从厌氧末端到出水 COD 几乎无明显变化,说明有机物在厌氧段就已经大部分被利用:一部分用于回流污泥中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的异养反硝化,另一部分被 PAOs 存储于胞内形成 PHAs 同时放磷。于是在缺氧段能用来进行异养反硝化的外碳源比较少,反硝化主要靠的是内碳源 (PHAs) 反硝化——反硝化除磷,由于内源反硝化的效率较低,速率较慢^[7],因此在缺氧段不足 2 h 的停留时间里,脱氮效率不可能很高。但是在这种运行条件下,反硝化除磷也相应得到强

化,经物料平衡计算,缺氧区吸磷量占总吸磷量的 45.4% 左右,比阶段 25.3% 有了很大提高。序批试验表明此时 DPAOs 占 PAOs 的比例提高到 31% ~ 40% 之间。最大程度地利用缺氧区的反硝化除磷,能够部分抵消由于碳源不足对系统脱氮除磷的影响。

2.3 缺氧好氧体积比对系统脱氮除磷的影响

在 2.2 节的分析中提到,缺氧区的水力停留时间太短,这样导致缺氧区反硝化除磷进行得不是十分充分。为了提高缺氧吸磷反应时间,可以从两个方面来考虑:一是增加缺氧区体积,即调整缺氧区和好氧区的体积比;二是调整硝化液回流比。

维持厌氧区容积不变,增加缺氧区容积,将缺氧区和好氧区的体积比从原来的 1/2 提高到 5/8,即减少一格好氧变为缺氧。图 4 是调整前后系统脱氮除磷的变化。从图中可以看出,当缺氧区容积变大后, SOP 去除仍然维持在 96.0% 以上,而 TN 去除率有所提高,从原来的 62.2% 提高到 70.7%,出水 TN 平均为 $15.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,较调整前的高于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 有所降低。

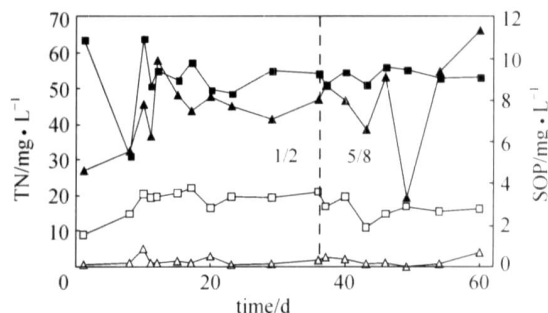


图 4 缺氧好氧容积比调整前后 TN 和 SOP 去除情况

Fig. 4 TN and SOP removal profiles before and after anoxic to aerobic volume ratio adjustment

■ influ TN; □ efflu TN; ▲ influ SOP; △ efflu SOP

对调整后的数据进行物料平衡分析,得出缺氧区吸磷量能占到总吸磷量的 55.2% 左右, DPAOs 占 PAOs 的比例也提高到 51.5% 左右。图 5 给出的是序批试验的结果。因此增加缺氧区和好氧区的体积比,能够提高反硝化除磷的作用,最大程度地利用厌氧区储存的内碳源同时用于脱氮和除磷,减小碳源缺乏对脱氮除磷的影响。传统 A^2O 工艺的设计参数中厌氧/缺氧/好氧的容积比为 1/1/ (3 ~ 4),这在处理低 C/N 比污水时显然是不合理的。从上面的试验结果可以看出,在处理低 C/N 比污水时,应凸显出缺氧区的作用,增大其容积。

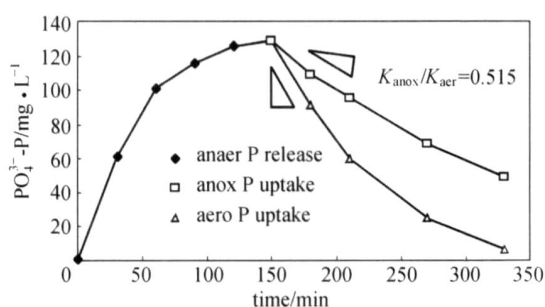


图 5 厌氧释磷和好氧、缺氧吸磷试验

Fig. 5 Phosphorus release and uptake under anaerobic-anoxic and anaerobic-aerobic conditions

2. 4 硝化液回流比对系统脱氮除磷的影响

硝化液回流比 (R) 对系统脱氮除磷和反硝化除磷的影响可以从以下几个方面理解: 硝化液回流提供了缺氧区的硝酸盐, 缺氧区的硝酸盐负荷超过普通异养反硝化负荷时, 才能刺激反硝化除磷, 从这个角度来讲, 回流比越大, 对反硝化除磷越有利; 从局部角度来看较大的回流比必将会导致缺氧区的水力停留时间变短, 而较短的反应时间对反硝化除磷是不利的; 回流比越大, 从好氧区末端带入缺氧区的 DO 越多, 对缺氧区缺氧环境的破坏也越大, 对反硝化及吸磷均不利。

维持反应器缺氧区和好氧区容积比为 5/8, 其他条件不变, 调整硝化液回流比为 200%、250% 和 300% 进行试验。图 6 是不同 R 和 TN、SOP 平均去除率之间的关系。从图中可以看出, SOP 去除受 R 的影响较小, R 对 TN 去除率的影响较大, 在 $R = 2.5$ 时系统的平均脱氮效率最高, 为 77.3%, 出水 TN 平均浓度为 $11.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这与上面的分析一致。在对 SOP 进行物料平衡分析时, 缺氧区的吸磷量在 $R = 2.5$ 时能达到 60.4% 左右, 反硝化除磷在 A^2O 中得到最大强化, 使得系统在处理较低 C/N 比污水时脱氮除磷的效率仍然很高。

3 结 论

(1) 52.5 L 的 A^2O 工艺处理实际生活污水, 在 HRT 为 8 h, 污泥回流比为 70%, 硝化液回流比为 300% 的情况下, 系统的 TN 和 SOP 的去除率分别为 85.4% 和 93.3%。系统缺氧区存在反硝化除磷现象, 反硝化除磷对总除磷量的贡献为 25.3%。

(2) 在运行条件不变的情况下, 处理 C/N 为

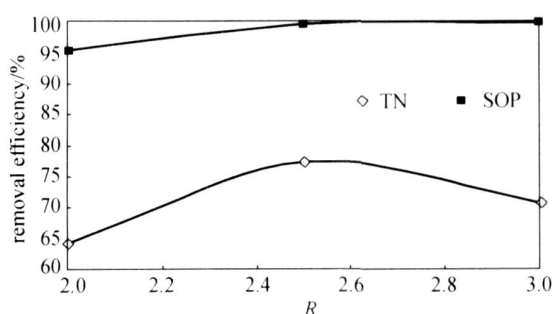


图 6 硝化液回流比 R 和 TN、SOP 平均去除率之间的关系

Fig. 6 Relationship between R and TN, SOP removal efficiency

4.20 的生活污水, 除磷效率受到的影响较小, 平均 SOP 去除率仍能维持在 96.6%, 但是 TN 去除率下降到 62.2%, 出水 TN 已经超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(3) 在其他运行条件不变的情况下增加缺氧区和好氧区的体积比, 能够强化缺氧吸磷, 物料平衡结果表明缺氧吸磷占到总吸磷量的 55.2% 左右。SOP 去除率仍维持在 96.0% 以上, TN 去除率也提高到 70.7%。

(4) 在缺氧区好氧区体积比不变的情况下调整硝化液回流比为 200%、250% 和 300%, 得出 250% 是适合本系统的最佳值, 在这种运行工况下系统的反硝化除磷效率最大, 能最大程度地减少由于缺少碳源对系统脱氮除磷的影响, TN 去除率提高至 77.3%。

(5) 在 A^2O 工艺处理低 C/N 比生活污水时, C/N 比较低对 TN 的去除影响较大, 对 SOP 的去除影响较小, 可适当增加缺氧区的容积, 调整最佳的硝化液回流比, 提高反硝化除磷效率, 实现提高整个系统的脱氮除磷效率。

References

- [1] Henze M. Capabilities of biological nitrogen removal processes from wastewater. *Water Sci. Technol.*, 1991 (23): 669-679
- [2] Ma Peishun (马培舜), Wang Hailing (王海玲), Cheng Lihua (成丽华). Current status and development of urban wastewater treatment in Kunming China *Water & Wastewater* (中国给水排水), 2003, 19 (4): 19-22
- [3] Wang Xiaolian (王晓莲), Wang Shuying (王淑莹), Ma Yong (马勇), Peng Yongzhen (彭永臻). Anoxic biological

- phosphorus removal and effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in A²O process. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, 56 (8): 1565-1570
- [4] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge. *Wat. Res.*, 1997, 31 (3): 471-478
- [5] Hu Z, Wentzel M C, Ekama G A. Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems. *Wat. Res.*, 2002, 36: 4927-4937
- [6] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Brandse F A, et al. Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants. *Wat. Res.*, 1997, 31 (4): 777-786
- [7] Bernat K, Wojnowska-Baryla, Dobrzyńska A. Denitrification with endogenous carbon source at low C/N and its effect on P(3HB) accumulation. *Wat. Res.*, 2008, 99: 2410-2418

www.cnki.net